基于新型电力系统计量需求的智能电表技术研究

张春晖 [1]　张震 [2]

（1．国 网 山 东 省 电 力 公 司， 山东 济南 250001;2．华能济南黄台发电有限公司，山东 济南 250100）

摘　要：本文主要讨论了新型电力系统的发展背景下，电能表计量技术和管理所面临的新挑战和变革。随着新能源的大规模接入，新型电力系统需要适应这种变化，而电能表作为电力系统的重要部分，也需要进行相应的改进和变革。文章提到了目前电能表存在的问题和挑战，包括分布式光伏站并网计量点的骤增和用户分布式光伏站并网计量方案的深化研究等。针对这些问题，文章提出了一些解决方案，包括采用智能配电网技术、推进智能电能表的性能和功能改善等。此外，文章还提到了分布式光伏发电系统的计量存在一些漏洞，如光伏发电电能表之后可能存在被篡改的情况。因此，需要采用智能化的监测和分析方案来改进现有的计量系统，以提高计量的准确性和可靠性。总的来说，随着新能源的大规模接入，新型电力系统的发展将带来一系列的挑战和变革。电表行业需要深入研究并积极应对这些挑战，以推动新型电力系统的顺利发展。

关键词：新型电力系统　智能电能表

中图分类号：TM933.4

Research on smart meter technology based on the metering needs of new power systems

ZHANG Chunhui[1]　ZHANG Zhen[2]

(1.State Grid Shandong Elect Power Co Ltd,Jinan , Shandong 250100 , China;2.Huaneng Jinan Huangtai Power Generation Co. , Ltd. , Jinan , shandong 250100 , China)

Abstract:This article mainly discusses the new challenges and changes faced by the metering technology and management of the power system under the development of the new power system. With the large-scale access of new energy, the new power system needs to adapt to this change, and the meter, as an important part of the power system, also needs corresponding improvement and transformation. The article mentions the current problems and challenges of the meter, including the sudden increase of grid connection metering points of distributed photovoltaic stations and the deepening research on the grid connection metering scheme of user distributed photovoltaic stations. In response to these problems, the article proposes some solutions, including using intelligent distribution network technology, promoting the performance and function improvement of smart meters. In addition, the article also mentions that there are some loopholes in the metering of distributed photovoltaic power generation systems, such as possible tampering of photovoltaic power generation meters. Therefore, intelligent monitoring and analysis solutions need to be

adopted to improve the existing metering system, so as to improve the accuracy and reliability of metering. Overall, with the large-scale access of new energy, the development of the new power system will bring a series of challenges and changes. The meter industry needs to conduct in-depth research and actively respond to these challenges to promote the smooth development of the new power system.

Key words: New power systems Smart meters

0 引言

2021 年 3 月 15 日，中央财经委会议提出:”十四五”是碳达峰的关键期，要深化电力体制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统。由此，能源行业将推进现有电力系统结构形态的深刻变化，从高碳电力系统，变为深度低碳或零碳电力系统；从确定性可控连续电源，变为不确定随机波动电源。在此基础上，构建起新型电力系统具有广泛互联、智能互动、灵活柔性、安全可控的基本特征。

在现有电力系统构成中，配电计量环节直面 99%的电力用户，并接入新能源。

其中，配电网起着分配电能的作用。目前，国网正在推行智能配电网技术，实现分布式能源接入后的配电网监控、电压/无功管理、应急处理和自愈控制、安全预警等功能，提高供电可靠性，同时，要改善电能质量、提高运行管理水平及经济效率。

目前,国网新一代智能电表是指 2020 年定型推出的单/三相智能物联电能表和 2020 版智能电能表，适应现有电力系统（接入百分之几的新能源）的计量需求，用于单向系统潮流的电力贸易结算计量与电网技术经济指标考核计量，以及为数有限的配用电扩展功能。其中，智能物联电能表在国内首次采用模组化结构设计，可以满足按需拓展功能的长期需求。

综合起来，面对行业的发展机遇，电表行业需要深入解读新型电力系统的目标、特征，研究、剖析新型电力系统配电网（以下简称为新型配电网）为解决消纳可观容量的新能源接入而引发电网运行不稳定、供电质量降低的难题，所采用的新技术，新控制、管理机制，提出电能表计量、管理变革的新课题，从而推进国产新一代智能电能表改善性能、拓展功能、扩大应用，适应新型电力系统的计量需求。

本文下面将叙述新型配电网提出电能表计量技术、管理变革的新课题:

1、新型配电网:接入分布式光伏站并网计量点骤增，深化用户分布式光伏站并网计量方案的研究

2060 年，全国新能源（风电、光伏）总容量为 50 亿 kW，占同年全国发电装机总容量（83.3 亿 kW）的 60%；比 2020 年，全国发电装机总容量（22 亿 kW）增长 2.27 倍。

1）40 年，分布式光伏站并网计量点增长 20.8 倍的估计

— 2020 年，按国网分布式光伏云网统计:接入 150 万个分布式光伏站，光伏总容量为 6000 万 kW，平均每个分布式光伏站 40kW。

2020 年，国网经营区:拥有 5.1 亿个用户用电量计量点（包括接入 150 万个分布式光伏站并网计量点），加上配电线路输入、输出电量计量点，两项合计约占电力系统全部计量点的 99%。

— 2060 年，光伏总容量为 12.5 亿 kW，占全国新能源总容量（50 亿 kW）的 25%。由平均每个分布式光伏站取值 40kW 计算，国网经营区:接入 3125 万个分布式光伏站并网计量点。

— 2060 年与 2020 年相比，国网经营区用户用电量计量点增长 2.13 倍（10.88 亿户/5.1 亿户），而分布式光伏站并网计量点增长 20.8 倍（3125 万个/150 万个）。

注:2060 年，国网经营区用户用电量计量点（10.88 亿个）测算:由 2060 年全社会用电量 16 万亿 kWh、2020 年每户年计量 1.47 万 kWh 导出。

2）40 年，国网经营区分布式光伏站并网计量点占用户用电量计量点的百分比增长 9.9 倍的估计

— 2020 年，国网经营区分布式光伏站并网计量点占全部用户用电量计量点的 0.29%（150 万户/5.1 亿户）。

— 2060 年，国网经营区分布式光伏站并网计量点 3125 万个，全部用户用电量计量点 10.88 亿个，占比为 2.87%。

— 2060 年与 2020 年相比，国网经营区:用户用电量计量点增长 2.13 倍（10.88 亿户/5.1 亿户），分布式光伏站并网计量点占用户用电量计量点的百分比，增长 9.9 倍（2.87%/0.29%）。

3）深化用户分布式光伏站并网计量方案的研究

下列内容部分摘自 2014 年 8 月，江阴长仪集团公司《发布式电源发电量计量技术探讨》（以下简称:”文 A”）。

— 问题出在光伏发电电能表之后

• 分布式光伏发电系统的基本设备，包括光伏电池组件、直流汇流箱、直流配电柜、并网逆变器、交流配电柜等。同时，还有供电系统监控装置和环境监测装置。

• 现行分布式光伏站并网计量（计费）方式

2013 年 2 月，国网公司关于印发《分布式能源相关意见和规范的通知》规定:建于用户内部场所的分布式电源项目，公司免费提供关口计量表和发电用电能表。由此明示:在用户用电侧不装电能表。其中，关口计量表采用双向计量电费结算或净电量结算的方式；发电用电能表记录光伏发电累计电量，用于向国家申请补贴的依据。

• 分布式光伏发电系统计量存在的漏洞:光伏发电电能表之后，有可能存在分布式光伏项目业主自行更改接线，如更改并网逆变器接线，通过同期装置接入低压电网电压，造成光伏发电电能表计量数据虚高的情况。

— 分布式光伏发电系统改进计量方案之一:由文 A 提出的光伏发电系统智能化监测、分析计量方案。其采用的主要技术:

• 实时记录光伏发电的直流电量、交流电量。

• 配有光照强度传感器，可以输出 24h 光照度曲线，通过比对，实时分析光伏电池发电量的合理性。

• 自动运算直流发电量与交流发电量的对应关系。根据设置的报警阀值，主动上报超阀值的信息。

— 分布式光伏发电系统改进计量方案之二:由本文作者研究提出:用户分布式光伏站并网计量方式由现行两表计量改为三表计量，通过三表电量平衡计算，可以杜绝分布式光伏发电系统计量存在的漏洞。以上三表计量方法:

• 在原有关口电能表（A）、发电用电能表（B）基础上，增加用户用电量电能表（C）。此三表，建议采用 0.5S 级单/三相电能表。

• 由关口电能表（A）按时采集 B 表、C 表计量数据，并计算三表电量不平衡率:

当 C--B=（--A），即光伏发电量多余，--A 为上网的光伏发电量；

当 C--B=（+A），即光伏发电量不足，用户由网供不足电量，+A 为下网的网供电量。

三表电量不平衡率按下式计算:

［（C--B）÷（+/- A）］×100%

• 三表电量不平衡率大于 1%，由关口电能表（A）主动上报，并由电网有关部门进行现场处理。

2、新型配电网:接入大规模新能源引发具有间隙性、随机性的双向电力潮流，推进新一代智能电能表提升计量性能的研究

大规模新能源接入配电网，电力负荷在很宽范围内随机变化，谐波含量高，需研究提升新一代智能电能表计量性能的主要项目:

1）关口电能表双向负荷过零计量的特殊性研究

双向负荷过零，压缩电能表过零计量死区、提高极低负荷下的计量准确度，是研究关口电能表计量特性的新内容。

双向电力负荷过零的快速、正确判断，应是大规模分布式新能源并网计量考核的重要指标之一。但目前还没有统一标准。

本文作者研究提出:

— 在电力负荷功率因数为 1 时，关口电能表需要提高极低负荷下的计量灵敏度。目前，可将单/三相关口表准确度等级提高到 0.5S 级或以上，起动电流降低到 0.1%。

— 在电力负荷的多个负荷点、功率因数为 0.01 下，调控计量误差在±2%以内

• 国际与国内多功能三相电能表在功率因数为 0.01 时的计量误差比较

2008 年，由重庆市电力计量中心提供多负荷点、功率因数为 0.01 下的测试报告:

兰吉尔 ZQ 三相关口表，计量误差为±0.6%；4 款国产多功能三相表为±10%。可见，那时的国产多功能表，计量过零误差不控制。

2008 年后，威胜推出 0.1S 级高准确度结算三相关口表，采用相位误差曲线补偿技术，在多负荷点、功率因数为 0.01 下，计量误差控制在±1%以内。

• 在负荷功率因数为 0.01 的计量误差如何溯源?

长期以来，国内电能表负荷功率因数为 0.01 的准确度计量溯源一直未开展。

2000 年前后，国内，省级电科院多批进口德国 EMH 产 0.01 级 K2006 型三相标准电能表。

2004 年，德国 EMH 公司北京公司专家郭越航给本文作者提供:由德国 PTB 出具的 K2006 型三相标准表检测报告，包括多负荷点、功率因数为 0.01 的误差数据 。由此，国内可以采用 K2006 型三相标准表，开展电能表多负荷点、极低功率因数下的计量核对业务。

2）快速响应动态电力负荷的变化，扩大电能表宽负载范围

文［A］叙述:对于风电、太阳能发电等受环境制约的新能源系统，电力负荷范围更宽、波动范围更大。

为保证宽负载要求，新一代智能电表 均为 10 倍以上的宽负载电能表；为适应分布式能源的计量需求，建议采用更宽负载的计量技术，如 1（100）A 的 100 倍宽负载电能表。

同时，为保证整个宽负载范围内计量误差曲线平坦，需规定对电能表误差曲线的误差带宽的要求，即误差曲线的最大与最小误差之差。

下面为本文提出电能表误差带宽的取值参考:

兰吉尔 0.2S 级 ZQ 三相关口表出厂误差曲线为±0.05%，即误差带宽为准确度等级的 0.5 倍。

国产智能电能表出厂误差一般控制在准确度等级的 0.6 倍，即误差带宽为准确度等级的 1.2 倍。

本文建议:国产分布式光伏站并网计量关口表，其出厂误差控制在准确度等级的 0.4 倍，即误差带宽为准确度等级的 0.8 倍。

3）面对新能源输出高含量谐波（间谐波形）负荷，加快谐波（间谐波）计量及量值溯源技术开发、应用

2003 年前后，国内，谐波有功、无功计量技术研究是个熱门；2009 年后，电表行业发展的关注点，转向智能电表技术、市场开拓；2020 年，国际上，传统谐波有功计量方式受到质疑与挑战。因此，2021 年，国内在构建新型电力系统进程中，重新提出谐波（间谐波）有功计量研究并增加基波有功计量技术开发、应用课题，很合时机。

— 国际上，现行电力贸易法制计量规则已经突破: 2021 年，加拿大实施基波有功电能量结算电费。

• 2021 年，加拿大安装所有仪表采用基波功率进行电能计量。

• 2019 年 5 月，在芬兰召开的国际（计量）会议讨论基波与谐波功率应用问题，提出:基于瓦特、乏尔、伏安的传统”功率三角形”在非正弦条件下不起作用。IEEE1459 标准的功率模型可提供合理的计算方法。

注: IEEE1459--2010 标准《在正弦、非正弦、平衡、或不平衡条件下，电功率定量测量的定义》
• 在加拿大，以谐波频率购买或销售电能，在许多司法管辖区是非法的。
• 仪表应反应法律要求。R46，仅用基波电能计量仪表；标准装置应能计量基波电能。
• IEC 已经发布: IEC62053-- 24:2014《静止式基本频率无功电能表（0.5S、1S 和 1 级）》标准。
— 国内，网上，就加拿大采用基波有功计量电能表进行过专题讨论，有些计量专家的观点:
• 支持基波计量。国内一直放任谐波污染，缺乏管控。只有采用基波计量，才能导致发电方和用电方的电能质量管控意识，有可能推动谐波治理装置的产业化。
• 现有表计，全波计量和基波计量差别不大。如用:基波+谐波 （绝对值），那差异就大一些。
• 采用基波计量电能是折衷计量方案。对电网，减少一些电费损失；对谐波源用户，减少一些抑制谐波设备的投资。
— 如何推进谐波（间谐波）有功计量（包括基波有功计量）及量值溯源技术开发、应用？
国网新一代智能电表技术规范已经提出谐波有功计量、基波有功计量的要求，但具体开发、应用进度尚不明朗。本文作者从电表行业多方面发展出发，提出下列主要研究项目:
• 将国际上的 IEEE 1459--2010 标准转化为国标，作为谐波（间谐波）负荷下，全功率（有功功率、无功功率、畸变功率、视在功率）合理计算的依据。
• 配变台区新能源注入高谐波（间谐波）负荷含量的仿真测试
其一，测试记录新能源（风电、光伏）按气候条件分类的不同地域、不同季节的典型日发电曲线。
其二，配变台区谐波（间谐波）负荷日波动曲线的实验室仿真测试与记录。
• 深入、扩展算法研究
采用傅立叶算法的计算精度，取决于数字离散序列的积分精度。
非线性负荷具有连续的频谱，DFT 算法已经不能解决问题，如间谐波产生的畸变，全波离散化而不被测量。目前，有些标准表就测不出来。
• 国产新一代智能电表提升高谐波（间谐波）负荷有功计量（包括基波有功计量）性能
其一，开展国产新一代智能电能表（包括电能计量芯片、滤波电路）对谐波（间谐波）计量敏感度测试；基波有功计量准确度测试。现在，有的智能电能表带宽不足、有功功率算法计算精度不匹配，对非线性负荷的谐波（间谐波）负载，测量到的能量误差偏负。
其二，国内，组织高水准技术力量、协同开发国产宽频带、宽负载、高准确度的单/三相电能计量芯片。
• 在 GB/T 17215.302 --2013《静止式谐波有功电能表》国际的基础上，研究制定高谐波（间谐波）负荷对新一代智能电表影响测试的补充规范。
注:GB/T 17215.302 --2013 标准包括基波有功计量准确度测试。
• 开展高谐波（间谐波）负荷计量量值溯源技术开发、应用
2007 年后，国内开展谐波计量溯源情况及后续研究工作
其一，2007 年 9 月，中国计量院发表《工频谐波功率标准研究》。之后，国内陆续开展标准电能表谐波有功计量（包括基波有功计量）精度校准。
其二，2010 年 4 月，原河南思达高科技公司发表《ST1000 型 0.01 级三相标准电能表的研制》。该标准表具有高准确度谐波有功功率计量（包括基波有功计量）测试功能。
ST1000 采用定采样频率的异步采样，所有的整周期采样的简化积分公式都不再适用，需要采用一种新的算法来提高异步采样的积分精度。
这里说明:原河南思达高科技公司退出电表行业后，国内，还有哪些企业生产具有高准确度谐波有功计量功能的标准电能表，尚待查询。
其三，在 JJG1106-- 2015 《工作用静止式谐波有功电能表》国家计量检定规程的基础上，研究制定高谐波（间谐波）负荷下，新一代智能电能表计量检定补充规范。
注:JJG1106--2015 规程包括基波有功计量准确度检定。

3、新型配电网:围绕应对新能源输出不确定随机波动、发展泛在电力物联网两个主要议题，强化新一代智能电能表拓展功能的研究

国产新一代智能电表具有两大特征:一是，适应贯彻 IR46 国际法制计量规范的需要，首次采用双芯（计量芯、管理芯）架构设计；再是，智能物联表的整机首次采用模组化结构设计，可以按需扩展功能。根据以上两个主要议题的计量需求，本文经汇总推荐/提出下列新一代智能电能表拓展功能的研究项目:

1）新一代智能电表融入虚拟电厂”发电”

虚拟电厂是在新型配电网上，实现大量分布式新能源并网，提高消纳能力的管理方法。它是由高级电力管理系统监控的小型分布式发电机组及可调控负荷通过通信网络连接而成的集合，用于平抑新型配电网负荷随机波动，或电网调峰

— 由用户可调控负荷构建的虚拟电厂（发电方案之一）

用户通过泛在连接、加装用电设备电能表计量耗电量，经分析出用户可调控负荷，用于编制虚拟电厂发电方案。

案例:上海，商业楼宇群能建虚拟电厂

电能表 24h 记录楼宇的照明、空调、电梯、电熱水器的耗电量。这些信息，回传到上海电网的虚拟电厂运行管理与控制平台。虚拟电厂可以将其中的分散可调控负荷进行重组，在同一时刻按照预设方案”发电”和用户设备自动停/限电。上海，全市近 3000 幢商业楼宇可调控负荷集中起来，相当于 1 台 100 万 kW 容量的火力发电机组。

— 由分布式电源构建的虚拟电厂（发电方案之二）

通过用户计费电能表实现对户内分布式光伏站、储能设备、微电网、小型发电机组等的监测、控制。这些信息，回传到配电网的虚拟电厂运行管理与控制平台，用于编制虚拟电厂发电方案待用。

2）扩大新一代智能电能表对新型配电网电能质量监测、控制功能的应用研究

目前，国网运行 5.1 亿只计量用智能电能表；这些表计，同时又作为有功、无功、视在功率，电压、电流、相位，谐波（间谐波）、畸变功率等的传感器，是电网各类传感器中数量最多的一类。新型配电网的电能质量监测，由于注入容量可观的非线性负荷，而需要扩大监测范围并研究新的管理机制。

按常规，新型配电网的电能质量监测、管理，由配网电力调度部门负责；用户侧包括分布式光伏站、储能设备并网计量点，户内设备耗电的电能质量监测、管理，是个新的管理问题，需要增加表计监测功能，或加装电能表来实施。这些用户侧及户内设备电能质量信息，宜由用电负控中心平台汇总提出电能质量就地协调、控制策略。

2020 年，国网已经发布:单/三相智能物联电能表用电能质量模组通用技术规范。其监测电能质量功能分稳态数据、暂态数据两类。

— 稳态数据，包括电能质量国标（6 项）规定的电压偏差、频率偏差、电压波动与闪变、谐波数据，并增加间谐波数据的要求。

— 暂态数据，包括电压暂降、电压暂升、短时中断，与《电能质量 暂时过电压与瞬态过电压》国标要求不一致。另增加由触发记录的有效值数据。

据此，有关单位可以组织开发单/三相智能物联表用电能质量模组，送国网/省级电网电力计量中心进行入网检测，争取列入国网/省级电网智能电表招标范围招标、应用。

3）基于新型智能电表的低压电网停电/上电信息主动上报功能设计方案评估

长期以来，低压电网的停电信息迟后、事故抢修不及时，成为低压电网管理的短板。

2017 年后情况有了变化，低压电网停电主动上报功能设计方案陆续推出，停电事故抢修也变为主动。

— 方案一:2017 年，苏州供电公司在国内首次发布”基于新型智能电表的配网主动抢修系统”

该系统的停电信息主动上报功能，是采用电能表本地通信模块上增加超级电容设计，同时增加微功率无线通信模块，使表计通过 HPLC 与微功率无线双模通信方式，主动实现将停电信息经采集终端、用电采集主站，发送到供电服务抢修管理平台。

— 方案二:江苏省电科院研发出”末端电网智慧感知系统”

该系统:用户停电，其电能表后端电压数据突然下降，异常数据通过拓扑关系逐级传递至分支箱、配变，配网管理部门在 30 秒内就了解到停电的用户，而无需逐户排查。

— 方案三:2021 年 3 月，浙江电力发表《基于双芯架构的停/上电主动上报电能表设计》

在新一代智能电表的计量芯上，加入掉电检测电路；增加计量芯、管理芯后备电源；增加蓝牙通信模块，用以在 II 型集中器采集模式下，实现电能表停/上电信息的主动上报。其主动上报工作流程:

由电能表生成的停/上电事件主动发送至上行通信模块。上行通信模块仅作为通信通道，将停/上电信息送至系统主站。

此方案，在 I 型及 II 型集中器采集模式下，均能满足电能表停/上电信息主动、快速、正确上报的需求。

— 本文点评

基于新型智能电表的低压电网停/上电信息主动上报，进而推进主动抢修机制建设，是提高低压电网用电可靠性的重要问题。此功能，民用电能表都宜配置。

本部分讨论的基于新型智能电表的低压电网停/上电主动上报 3 类方案，本文作者认为:由浙江电力研发的主动上报方案，I 型和 II 型集中器均能采用，其功能比较全面，但需要改进新一代智能电表设计。因此，最终选用何方案，建议:由国网计量管理部门组织进行评定。

结语

进入 2021 年，国网新一代智能电表在挂网运行、应用起步的时候，就面临新的发展机遇。

以上新型配电网对新一代智能电表提出的计量需求，归纳起来主要有:分布式光伏发电系统改进方案研究；关口电能表双向负荷过零计量、扩大宽负载范围、谐波（间谐波）计量及量值溯源课题；电能表如何融入虚拟电厂”发电”，扩大新型配电系统电能质量监测与控制范围，基于新型智能电表的低压配电网停/上电主动上报，进而推进主动抢修机制建设等。

前面已经叙述，国网新一代智能电表具有双芯架构设计，智能物联表采用模组化结构设计，适应按需扩展功能的需求。这些表计新设计，正是新一代智能电表具备服务新型电力系统计量需求的技术基础。

2020 年 12 月,本文作者预期:从 2021 年起,国网需更换不符合 IR46 标准及新技术应用要求的 2009 版、2013 版智能电表 4.3 亿只，2021 年预期需用新一代智能电表 6000 万只。

从实际情况看，2021 年，能源行业推进构建新型电力系统，增加对新一代智能电表的需求。今年，国网第 1 次智能电表（含用电采集设备）招标，所有类型设备总需求量为 3745 万只/台，整体需求量同比增加 46%。其中，A 级单相表、B 级三相表、集中器采集器增加 50%。估计 2021 年，国网电能表招标总量将达到 7000 万只。未来 5 年，国网新一代智能电表应用前景看好。

参考文献

[1] 黄蕾 通讯员 黄飞英 **让配网抢修更智能高效** 《国家电网报》- 2018-02-06

作者简介： 张春晖 男， (1938-)， 从事电能计量技术研究。

通讯作者： 张震 男， (1977-)， 从事电能计量技术研究 721047546@qq.com